



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia de Energia**

**ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DO
COMPORTAMENTO DE UMA TURBINA EÓLICA
EM ESCALA REDUZIDA**

**Autor: Ricardo Gonçalves Araújo Lima
Orientador: Augusto César de Mendonça
Brasil**

**Brasília, DF
2013**



RICARDO GONÇALVES ARAÚJO LIMA

**Estudo experimental e numérico do comportamento de uma turbina
eólica em escala reduzida**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Professor Dr.
Augusto César de Mendonça Brasil

Co-Orientador: Professor Dr.
Luciano Gonçalves Noleto

**Brasília, DF
2014**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Lima, Ricardo Gonçalves Araújo.

Estudo experimental e numérico do comportamento de uma turbina eólica em escala reduzida/ Ricardo Gonçalves Araújo Lima. Brasília: UnB, 2013. 43 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2013. Orientação: Augusto
César de Mendonça Brasil

1. Turbina Eólica. 2. Simulação Experimental. 3.
Simulação Numérica

I. Brasil, Augusto César de Mendonça. II. Doutor

CDU Classificação



ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DO COMPORTAMENTO DE UMA TURBINA EÓLICA EM ESCALA REDUZIDA

Ricardo Gonçalves Araújo Lima

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 25/06/2014 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr.: Augusto César de M. Brasil, UnB/ FGA
Orientador

Prof. Dr.: Luciano Gonçalves Noleto, UnB/ FGA
Co-orientador

Prof. Dr. Jorge Cormane, UnB/ FGA
Membro Convidado

Brasília, DF
2013

"Não deixe que a vida te transforme aleatoriamente no adulto que você não quer ser." (Chris Hadfield)

RESUMO

A crescente demanda por novas fontes de energia tem proporcionado um aumento significativo, nos equipamentos que possibilitam a geração de energia. Partindo deste preceito verifica-se a necessidade de se conhecer o funcionamento de uma turbina eólica, sabendo que este equipamento é o principal responsável pela conversão da energia cinética dos ventos em energia mecânica e posteriormente em elétrica. O presente trabalho visa por meio de estudos experimentais e numéricos caracterizar o funcionamento de uma turbina eólica em escala reduzida. Tal feito será realizado por meio da variação e análise de algumas variáveis da turbina, sendo a quantidade de hélices, o ângulo que cada uma se dispõe e o perfil utilizado. Os dados experimentais serão coletados por meio de experimentos realizados no túnel de vento, e os dados numéricos por meio do Ansys-CFX. Por necessidade o trabalho abre um pouco sua área de atuação e também abrange a parte de instrumentação do túnel de vento. Por fim realizou-se os devidos experimentos e verificou-se um resultando satisfatório apenas para a análise dos perfis das pás, com um comparativo entre o meio experimental e numérico.

Palavras-chaves: Turbina eólica. Túnel de vento. Análise experimental.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS	9
1.1.1. Energia no Brasil	11
1.2. OBJETIVO	14
1.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. REFERÊNCIAL TEÓRICO	16
2.1. TURBINA EÓLICA	16
2.1.1. Potência de uma turbina eólica	16
2.1.2. Força de Arrasto	19
2.1.3. Força de Sustentação	21
2.1.4. Variáveis ligadas turbinas eólica	22
2.1.5. Mecanismos de controle	24
2.1.5.1. Controle de stall	24
2.1.5.2. Controle de passo	25
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	26
3.1. Descrição dos componentes experimentais	27
3.1.1. Kit windpitch	27
3.1.1.1. <i>Variação quanto o número e tipo de pás</i>	28
3.1.1.2. <i>Análise do ângulo de ataque</i>	28
3.1.1.3. <i>Carga</i>	29
3.1.2. Túnel de vento	29
3.1.2.1. <i>Instrumentação do túnel de vento</i>	31
3.1.2.1.1. <i>Tubo de pitot</i>	31
3.1.2.1.2. <i>Inversão do Motor</i>	32
3.2. Experimentos realizados e procedimentos	33
3.2.1. Túnel de Vento	33
3.2.2. Turbina eólica	34
3.2.2.1. <i>Teste com variação DO NÚMERO de pás</i>	34
3.2.2.2. <i>Teste com variação de ângulo</i>	34
3.2.2.3. <i>Teste com variação de Carga</i>	34
4. Método de simulação	35
5. RESULTADOS	38
5.1. Resultados Experimentais	38
5.1.1. Variação do número de pás	38
5.2. Perfis NACA 44 e NACA 63	41
5.3. Resultados Numéricos	42
5.3.1. Ansys-CFX	42
5.3.2. XFoil	43
6. CONCLUSÃO	44
Bibliografia	45

1. INTRODUÇÃO

Existe um conjunto de fontes energéticas, tendo estas características e princípios específicos. Para um melhor entendimento deste trabalho se faz necessário agrupar os diversos tipos de fontes. A classificação quanto a capacidade que a fonte tem de se renovar, comparado o tempo de utilização, é a que se mostra mais interessante.

Por isso será levantado os progressos das fontes energéticas num contexto mundial e nacional, e com isso destacar como a energia eólica tem evoluído.

1.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS

Conforme disponível em (CAPRIGLIONE, 2006), quando o tempo de regeneração é curto o suficiente para não causar taxa de decaimento da fonte, esta é dita fonte renovável. Em contraste, as fontes não renováveis necessitam de um tempo de regeneração em uma escala de tempo bem maior. Na figura 1, se tem um organograma das fontes de energia. É possível observar duas colunas onde na primeira se tem as fontes renováveis e na segunda as não renováveis. A geotérmica, gravitacional, solar, eólica, hidráulica, biomassa são exemplos de fontes renováveis. Petróleo, gás natural, carvão são não renováveis.

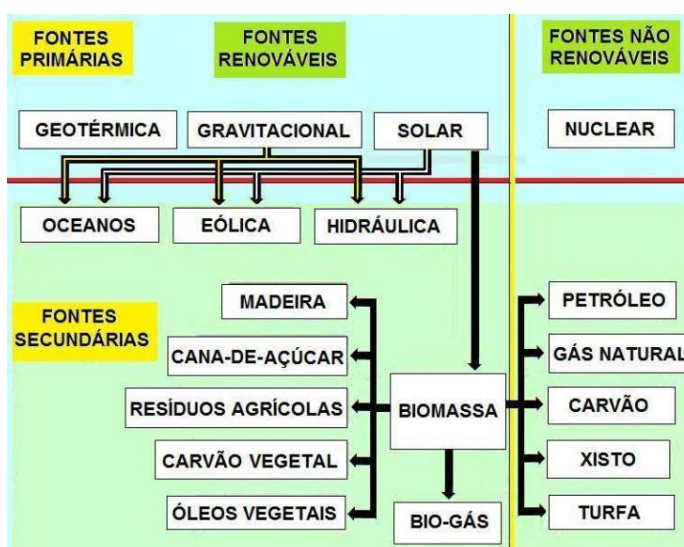


Figura 1 Organograma das Fontes Energéticas. Fonte: Café História

A energia é um dos alicerces do desenvolvimento econômico, tal fato fica evidenciado quando se observa a proporcionalidade de crescimentos de ambas as

variáveis (GOLDEMBERG, 2000). Tendo conhecimento que se desenvolver é um fator de importância relevante para qualquer nação, é necessário garantir que a escassez energética não trabalhe como um fator limitante para o processo.

Para validar que fontes de energia limpa cresçam e entrem com uma maior contribuição no contexto de utilização global, observa-se a necessidade de melhorias nas tecnologias de conversão. Tal fato fica evidenciado quando se observa, que apesar de uma grande variedade de fontes renováveis existentes, são os combustíveis fósseis que tem uma maior demanda de mercado.

Para uma melhor observação de como se distribui a utilização das fontes energéticas no mundo, é possível observar as figuras 2 e 3, onde se tem o consumo de combustíveis fósseis, nuclear e renováveis além de uma subdivisão dentro dos renováveis. As figuras 2 e 3 remetem a anos diferentes, por meio de uma comparação verifica-se a evolução das fontes renováveis, onde ocorreu um crescimento de 16,7% para 19% em apenas um ano. Destaque também para o crescimento da energia eólica, dentro do campo de energia renováveis.

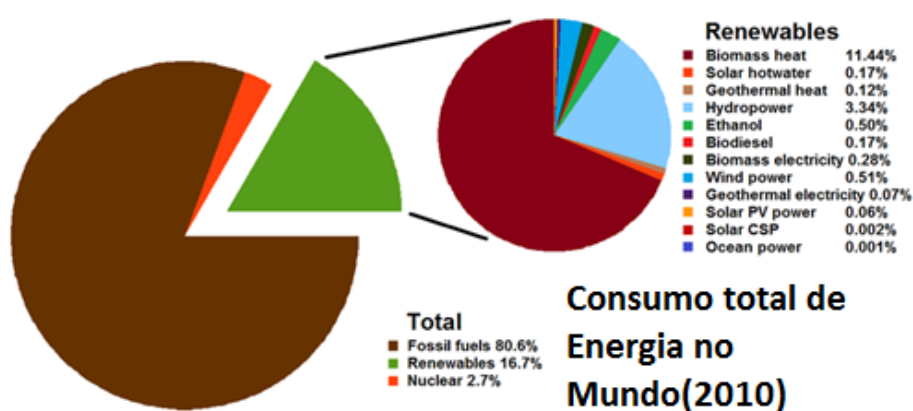


Figura 2 Consumo total de energia por fontes em 2010. Fonte: Renewables 2012 Global Status Report

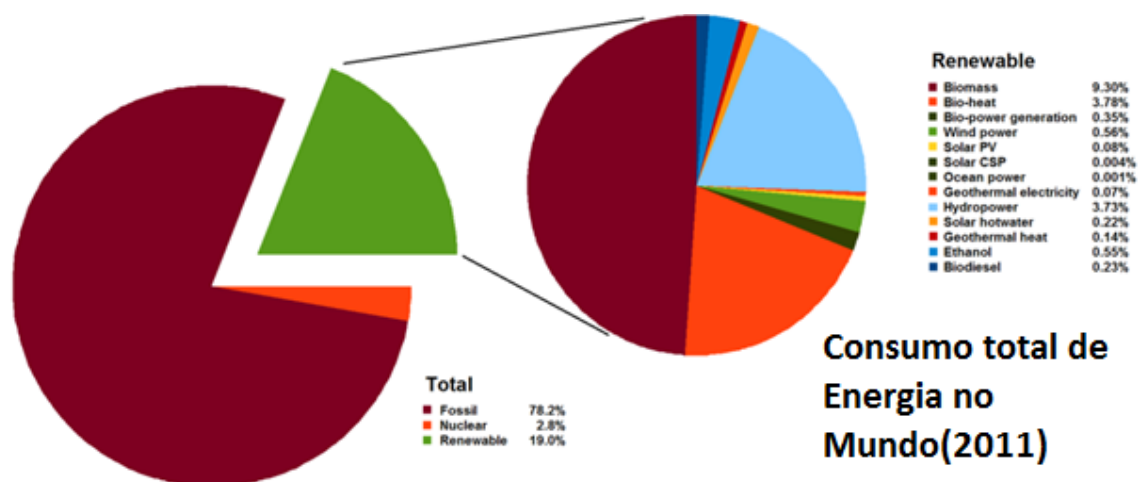


Figura 3 Consumo total de energia por fontes em 2011. Fonte: Renewables 2013 Global Status Report

1.1.1. Energia no Brasil

Heringer (2010) analisa o consumo energético e observa que mais de 40% do total é utilizado no setor industrial, o que garante uma estreita relação entre o Produto Interno Bruto(PIB), e o consumo energético. Este fato é recorrente em grande parte dos países do mundo, e por isso a busca por fontes renováveis se torna um fator atrativo, quando se tem o perigo futuro de escassez das fontes não renováveis. No entanto o que garante a matriz energética do Brasil em uma posição diferenciada se comparada ao consumo mundial é o fato que esta tem uma produção de energia renovável elevada, chegando a 42,4%, conforme figura 4.

Repartição da oferta interna de energia

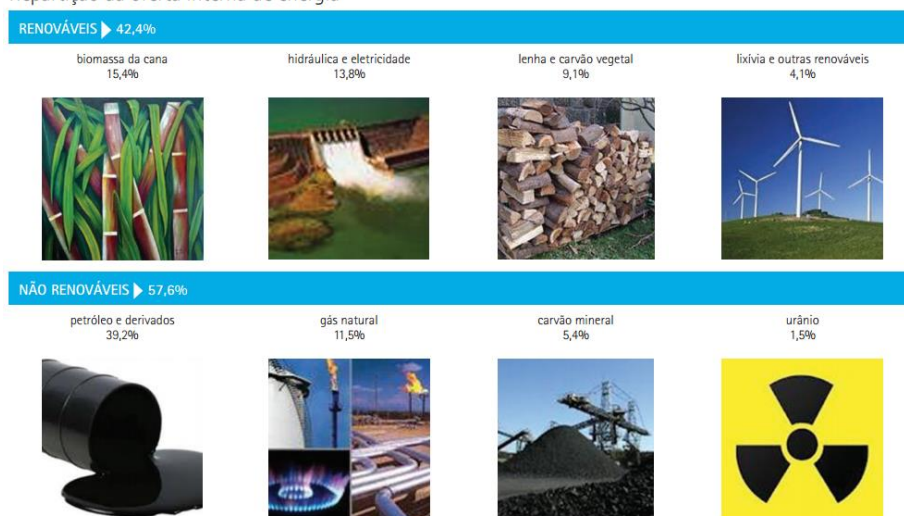


Figura 4 Repartição de oferta energética. Fonte: BEN 2013, EPE, MME

A figura 5, mostra os percentuais de cada fonte de energia no ano de 2012, reafirmando assim o alto nível de inserção de energia renováveis, haja vista que a eletricidade que apresenta 16,9% da matriz tem sua maior parte de sua produção por meios fontes renováveis.

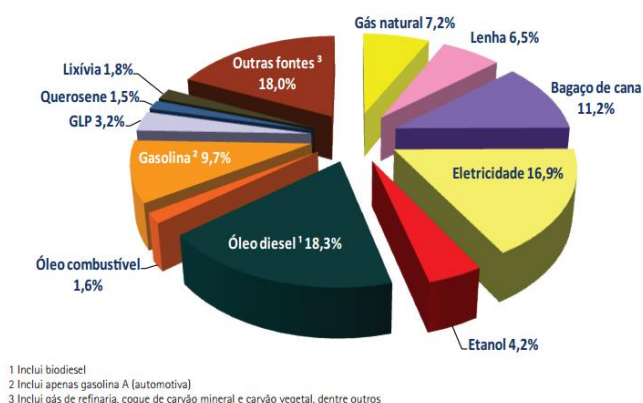


Figura 5 Consumo de energia por fonte em 2012. Fonte: EPE

Diante do consumo energético é possível, destacar uma destas fatias e fazer uma análise mais detalhada. O montante ligado a eletricidade, é o que se torna mais importante para fins de entendimento deste trabalho. Por isso foi evidenciado na figura 6 como a matriz elétrica brasileira está disposta, apresentando o percentual que cada fonte produziu nos anos 2012 e 2013.

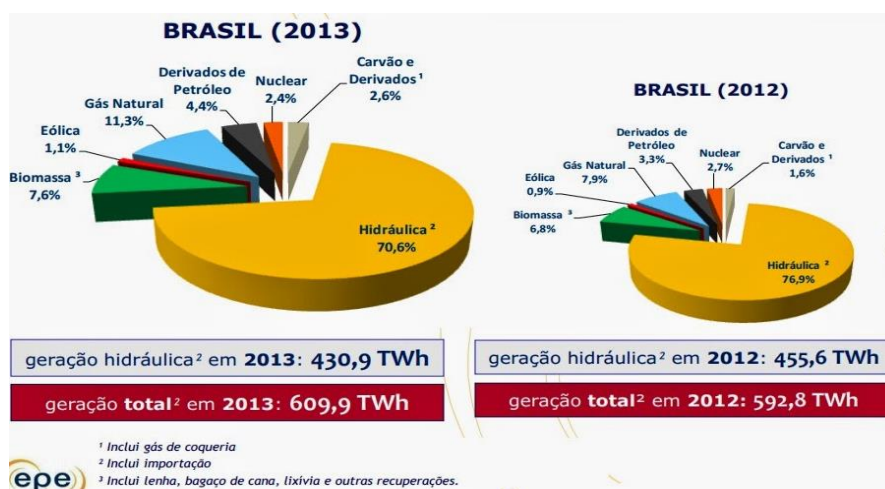


Figura 6 Matriz elétrica brasileira para os anos de 2013 e 2012. Fonte: EPE

Apesar do domínio mostrado pela geração hidráulica, o momento que nos encontramos atualmente, gera uma busca de produção mais diversificada. O que explica o crescimento das energias geradas por biomassa e pela eólica, que apesar de estarem em pequenas proporções demonstram um crescimento acentuado.

Desde a criação do Programa de Incentivo às fontes alternativas de Energia Elétrica (Proinfa) em 2002, a energia eólica tem se destacado como umas das principais alternativas, isto porque o potencial eólico se mantém alto durante o período que se tem o menor nível de intensidade pluviométrica.

Segundo a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (2014), em janeiro de 2014 a capacidade instalada dos parques eólicos em operação comercial no Brasil é de 2211 MW um total 20% maior se comparado ao mesmo mês do ano anterior. Já a geração teve um aumento de 25% no mesmo período chegando a 763 MW.

O mapa da figura 7 mostra que existe um bom do potencial eólico nacional, especialmente na região que se estende por todo o litoral brasileiro e uma parte do Centro-oeste. Contudo, alguns fatores determinaram a pouca exploração do recurso eólico nacional. Na figura também fica claro que o potencial a ser explorado inicialmente, será aquele com as cores mais escuras que são referentes às maiores velocidades de vento. Contudo, após esgotamento da exploração dos maiores potenciais, nas próximas décadas deverão ser explorados os potenciais com velocidades menores. Portanto, pesquisas serão necessárias para desenvolvimento de aerogeradores mais adaptados às baixas velocidades.

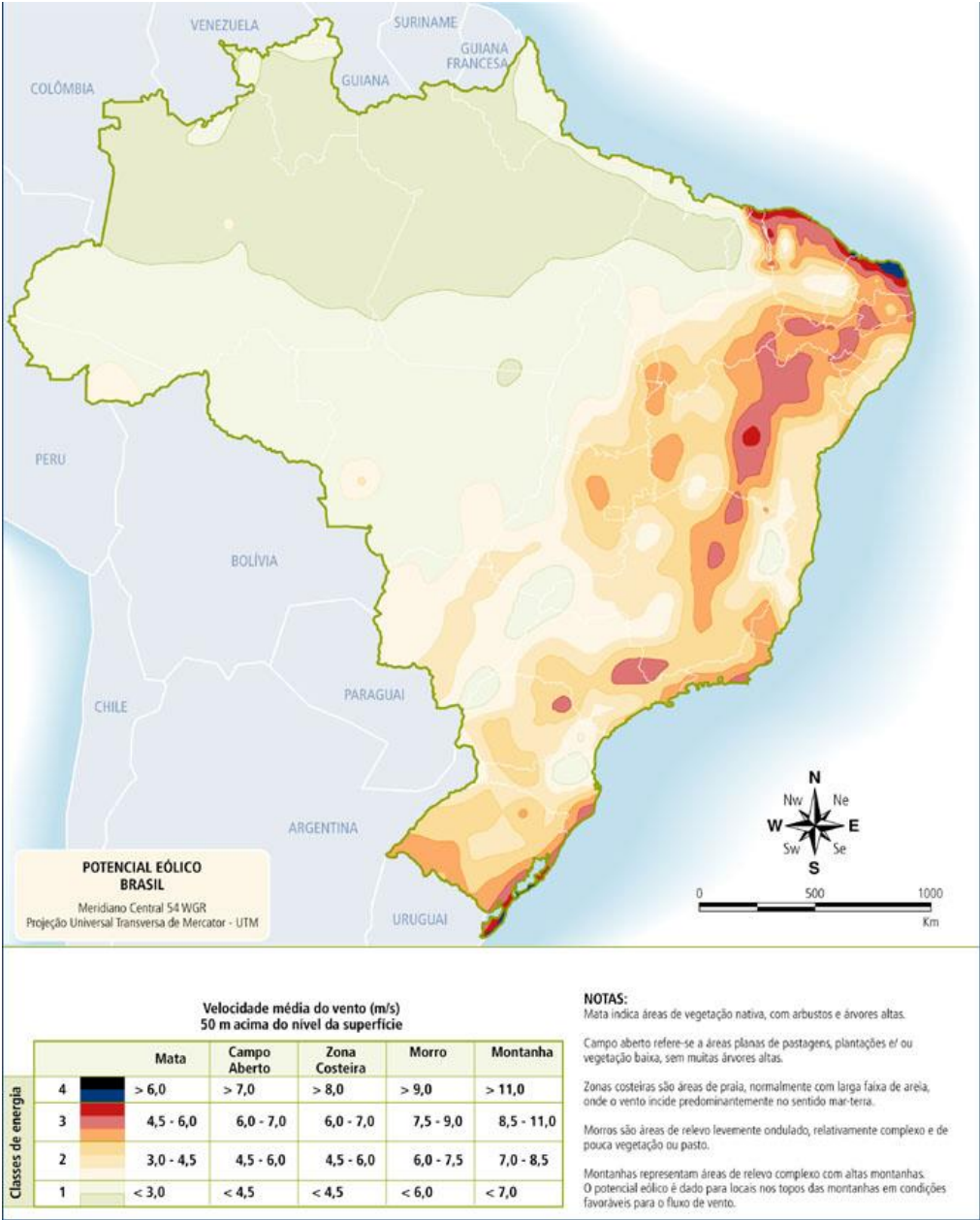


Figura 7 Potencial Eólico Nacional. Fonte Aneel, 2003.

1.2.OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é realizar um estudo experimental, com apoio numérico, de uma turbina eólica em escala reduzida instalada no túnel de vento do Laboratório de Termofluidos da Faculdade UnB Gama. Tal estudo se destinou a verificar o comportamento do aerogerador em escala reduzida no que diz respeito às potências elétricas geradas em função dos ângulos das pás e de dois perfis de pás diferentes.

1.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar o estudo experimental e numérico, em túnel de vento, de uma turbina eólica em escala reduzida Modelo FCJJ-27, fabricante Horizon Fuel cell Technologies do kit windpitch contemplando as seguintes análises:

- Caracterização do Túnel de Vento, com suas velocidades médias e perfis de velocidades na seção de teste;
- Aplicação de dois perfis de pás diferentes, o Naca 44 e Naca 63
- Variação do número de pás do aerogerador;
- Variação dos ângulos de ataque das pás;
- Variação das cargas elétricas no gerador;
- Comparação numérica dos coeficientes de sustentação e arraste dos perfis utilizados.

2. REFERÊNCIAL TEÓRICO

O presente trabalho realizou um estudo em modelo reduzido de um aerogerador instalado em um túnel de vento de seção de teste de 81x72 cm. Portanto, para determinação da energia eólica disponível, um modelo simples pode ser utilizado com equações de fluidos.

2.1. TURBINA EÓLICA

Turbina eólica, ou aerogerador, consiste em um dispositivo que absorve parte da energia cinética do vento por meio do seu rotor aerodinâmico, convertendo esta energia em potência mecânica de eixo, que posteriormente é convertida em potência elétrica por meio de um gerador. Um modelo comum de turbina eólica pode ser observado na fig. 8, a área varrida pelas três pás do aerogerador está em destaque



Figura 8 Esquemático de uma turbina eólica

2.1.1. Potência de uma turbina eólica

A área varrida pelo rotor capta a energia cinética do vento que percorrem nesta região. A energia cinética contida no vento é dada na Eq. (1) considerando que este se move a velocidade v_1 e tem massa de ar(m):

$$E = \frac{m \cdot v_1^2}{2} \quad (1)$$

Tendo por conhecimento que a potência(P) é a derivada da energia em relação ao tempo temos a eq. (2):

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{\dot{m} * V_1^2}{2} \quad (2)$$

Quando uma massa de ar (m) passa através de uma área (A), em um certo intervalo, tem-se o fluxo de massa que é apresentado na eq(3):

$$\dot{m} = \rho * V_1 * A \quad (3)$$

Tendo:

P = potência disponível no vento [W];

E= energia cinética do vento[J];

t = tempo [s];

\dot{m} = fluxo de massa de ar[kg/s];

V_1 =velocidade do vento [m/s];

ρ = massa específica do ar [kg/m³]

A= área da seção transversal [m²];

Um melhor entendimento destas variáveis, pode ser obtido ao se analisar a figura 9. Onde A representa a área transversal varrida pelas pás do aerogerador, V_1 é a velocidade, as setas mostram a direção pela qual a massa de ar se movem, e o cilindro que varre toda a figura representa o caminho do fluxo de ar.

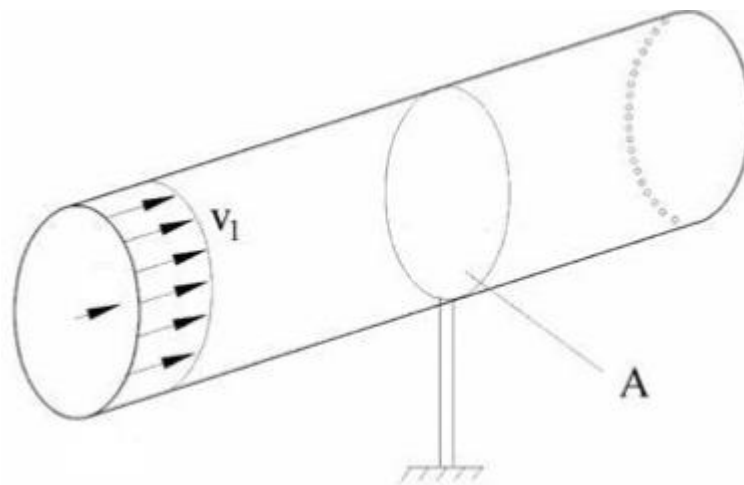


Figura 9 Simulação de fluxo de ar que atravessa o rotor da turbina

A Eq. (3) representa o fluxo de massa e pode ser demonstrada pela simplificação da equação da continuidade, considerando o caso particular em que se tem o escoamento uniforme e permanente.

De forma geral o princípio da conservação da massa para qualquer volume de controle é definida pela Eq. (4).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV + \int \rho \vec{V} d\vec{A} = 0 \quad (4)$$

Quando se considera o escoamento permanente, não há variação de massa dentro do volume de controle, fazendo com que o resultado da derivada do primeiro termo seja nula. No estudo das turbinas podemos considerar o volume de controle é um cilindro de corrente e o fluido irá ultrapassar unicamente a fronteira de entrada (A_1) e saída (A_2), obtendo a equação da conservação da massa resultante:

$$\int \rho \vec{v}_1 d\vec{A}_1 + \int \rho \vec{v}_2 d\vec{A}_2 = 0 \quad (5)$$

Tendo o escoamento uniforme a massa específica permanece a mesma, não variando com área. A velocidade também é uniforme para toda a área. Simplificando assim a integração por um produto escalar dos vetores V e A . Tal produto é caracterizado pelo produto do módulo dos vetores com o cosseno do ângulo entre eles.

$$\int \rho \vec{V} d\vec{A} = \rho_n \vec{V}_n \vec{A}_n \quad (6)$$

O resultando pode ser positivo ou negativo, dependendo do sentido do escoamento. Como o sentido de entrada e saída são contrários temos:

$$-\rho_1 v_1 A_1 + \rho_2 v_2 A_2 = 0 \quad (7)$$

Chegando assim a equação do fluxo de massa:

$$\dot{m} = \rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 = \rho v A \quad (8)$$

Com a correlação entre as eq(2) e (3), a potência disponível pode ser descrita como:

$$P_{disp} = \frac{1}{2} * \rho * V_1^3 * A \quad (9)$$

Contudo nem toda essa potência consegue ser convertida, haja vista que existe o coeficiente de potência do rotor (C_p) e o rendimento do conjunto gerador / transmissões mecânicas e elétricas (η). Segundo Santana (2009) o coeficiente aerodinâmica de potência do rotor tem seu valor máximo teórico, de acordo com a lei de Betz, logo a eficiência máxima que pode ser alcançada é de aproximadamente 59,3% e varia com o vento, a velocidade de rotação e outros parâmetros da turbina. Considerando assim estes limitadores, a formulação mais adequada se dá assim:

$$P_{util} = \frac{1}{2} * \rho * V_1^3 * A * C_p * \eta \quad (10)$$

No parágrafo acima, foi citado o coeficiente de Betz, este se caracteriza por seu um limite de rendimento teórico ideal, no qual se considera que não existe perdas. Tal fato fica evidenciado quando observamos o que foi dito por Custódio(2009), onde este afirma que apenas 2/3 da massa é capaz de fazer a turbina girar, e o outro terço é desviado pelas laterais. Sendo assim:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} \left(\rho * A * \frac{2}{3} V \right) V^2 - \frac{1}{2} \left(\rho * A * \frac{2}{3} V \right) \left(\frac{1}{3} V \right)^2 \quad (11)$$

Com uma simplificação simples observa-se que

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{16}{27} * P_{disp} \quad (12)$$

Como resultados da fração têm que 59,3% é a máxima potência conseguida. Que segundo Marques(2004) é a energia disponível no vento a ser convertida em potência mecânica, mas na realidade esse valor é menor chegando a 0,2 em turbinas que utilizam a força de arrasto para movimentar o rotor e 0,5 para as que utilizam a forma de sustentação.

2.1.2. Força de Arrasto

Certas turbinas utilizam a força sobre a área perpendicular à direção do vento, a qual é denominada de força de arrasto, que é regida pela eq. 13.

$$D = C_D \frac{\rho}{2} A v^2 \quad (13)$$

Onde D é a força de arrasto e c_d é o coeficiente de arrasto. Este coeficiente tem um valor que depende da geometria da pá, e essa relação pode ser observada na tabela 1.

C_p	<i>Forma</i>
1,11	Plano circular
1,10	Plano Quadrado
0,34	Semi-esfera(Côncavo)
1,33	Semi-esfera(convexo)

Segundo Marques (2004) os valores de torque, velocidade do eixo e potência das turbinas, podem ser obtidas por meio de uma simplificação que considera a velocidade relativa do vento w como uma composição da velocidade do vento v e a velocidade das pás u , onde $u=w \cdot R$, tendo R o raio de varredura.

$$D = c_D \frac{\rho}{2} A w^2 = c_D \frac{\rho}{2} A (v - u)^2 \quad (14)$$

E a potência mecânica pode ser expressa por:

$$P_m = D u \quad (15)$$

Substituindo eq. (14) em (15):

$$P_m = c_D \frac{\rho}{2} A v^3 \left\{ c_D \left(1 - \frac{u}{v} \right)^2 \frac{u}{v} \right\} \quad (16)$$

Como:

$$C_p = C_D \left(1 - \frac{u}{v}\right)^2 \frac{u}{v} \quad (17)$$

É possível reescrever a potência em função de c_p :

$$P_m = c_D \frac{\rho}{2} A v^3 c_p \left(\frac{u}{v}\right) \quad (18)$$

Pelas equações acima é possível observar que o que C_p depende da relação entre a velocidade na ponta da pá(u) e velocidade do vento v . Tal relação chamada de *tip speed ratio* (TSR), tendo a formulação e será melhor abordada no controle de stall:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (19)$$

2.1.3. Força de Sustentação

Diferente do modelo anterior, esse tipo de turbina tem um perfil aerodinâmico que possibilita que a força resultante seja obtida pela interação da componente de arrasto, e além desta, tem-se uma componente perpendicular à velocidade relativa, a qual dá-se o nome de força de sustentação. A equação 20 mostra a força formulação da força de sustentação:

$$L = c_l \frac{\rho}{2} A v^2 \quad (20)$$

Tendo c_l como coeficiente de sustentação. Segundo Marques (2004) considera-se que força de sustentação atua em aproximadamente $\frac{1}{4}$ do comprimento da corda e que trabalha em região fora da perda aerodinâmica(*stall*), é possível obter uma relação de proporção entre o ângulo de ataque e o coeficiente.

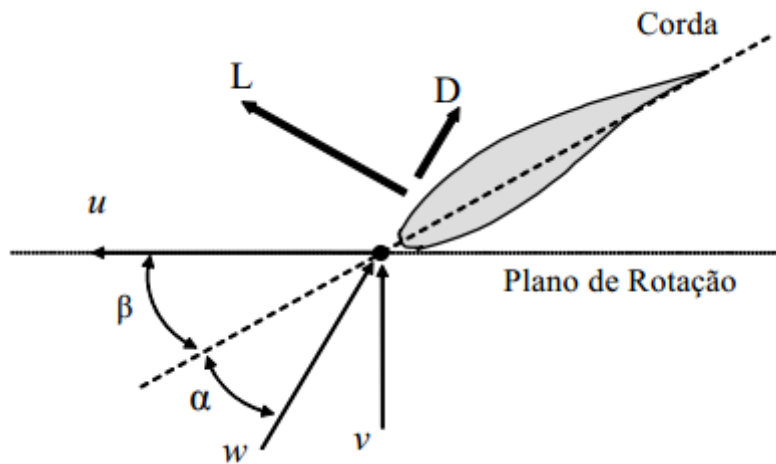


Figura 10 Representação das variáveis ligadas ao perfil

A potência mecânica a se extrair do vento, por esse tipo de turbina é dada por:

$$P_m = c_D \frac{\rho}{2} A v^3 c_p(\lambda, \beta) \quad (21)$$

Tendo o c_p variante com o TSR, ângulo de passo(β) da relação $\frac{c_l}{c_d}$ do perfil selecionado e do número de pás da turbina

2.1.4. Variáveis ligadas turbinas eólica

Turbinas eólicas durante todo seu contexto histórico são fabricadas com as diversas variações, podendo ser estes quanto ao número de pás no seu rotor e quanto a posição do eixo de rotação entre outras. Verificando que a turbina que será utilizada tem a posição do eixo de rotação horizontal, as demais considerações deste item são verificadas para tal tipo de turbina, excluindo assim uma análise mais detalhada para as turbinas de eixo vertical.

Turbinas de eixo horizontal podem ser classificadas em upwind e downwind, que se deve a posição rotor quanto a incidência do vento. Nas downwind o vento incide por trás da turbina eólica, tal configuração tem a vantagem de não necessitar de mecanismo de direcionamento, contudo existe um crescimento acentuado da turbulência, tendo em vista a torre da própria turbina que irá modificar a trajetória do vento antes de incidirem na pá.

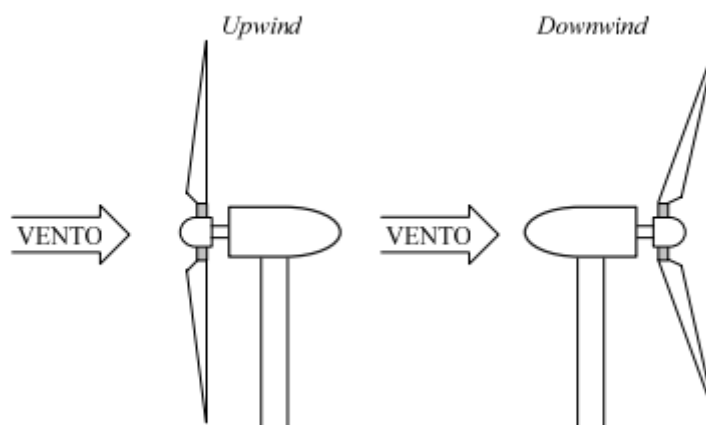


Figura 11 Direção do vento para turbinas upwind e downwind

Nas upwind segundo Marques(2004), a desvantagem se aloca no fato da passagem periódica das pás pela torre que causam pulsações de torque na turbina necessitando de orientação direcional.

A diferenciação do número de pás segundo Marques(2004) está indiretamente relacionado ao TSR. Quando se tem um TSR baixo ($\lambda = 1$), necessita de uma área de varredura bastante ampla gerando a necessidade de um número elevado de pás. Já as turbinas que trabalham com velocidade mais alta e tem $\lambda > 6$, são projetadas geralmente com três pás, porém podem ter um ou duas pás.

Logo uma análise pode ser feita verificando a quantidade de pás, para cada caso de aplicação, tendo em vista que quão maior a velocidade melhor é a geração de energia elétrica, contudo para os processos de bombeamento de água e os processos de moagem, idealiza-se um torque mais alto e baixas velocidades obtida com uma quantidade maior de pás.

Em maior quantidade no mercado turbinas com um número menor de pás se mostram mais atrativas, isto porque o custo das pás pode chegar a 80% do projeto, Marques (2004). Contudo a utilização de turbinas com uma e duas pás levantam algumas problemáticas que deixam a tradicional turbina de três pás em vantagem no mercado.

Rotores com uma ou duas pás, embora tenham um custo menor, necessitam de um rotor mais complexo, afim de evitar danos causados pelos esforços que são maiores quando comparados a turbina com mais pás. Outro fator agravante se dá aos problemas ocasionados pelo ruído, que tendem a aumentar já que a velocidade

rotacional também será elevada para se obter a mesma potência requerida por três pás.

Em maior quantidade no mercado, o rotor com três pás são os que mais têm acesso ao mercado, isto é devido ao seu melhor balanceamento, e testes que comprovam que estas apresentam um menor ruído e vibrações, segundo Marques (2004).

2.1.5. Mecanismos de controle

Santos et. al (2006) relata que os mecanismos de controle, podem atuar em algumas vertentes entre as quais estão a orientação do rotor, o controle de velocidade, e o controle de carga. Devido essa diversidade os controles podem ocorrer visando uma parte mecânica, quando ligado a velocidade, passo e freio, a parte aerodinâmica, quanto ao posicionamento do rotor, ou até mesmo eletrônicas para se obter um controle de carga.

Ao se verificar a formulação supracitada no que tange a potência, é possível perceber que a velocidade com que a massa de ar passa pela turbina, gera forças de sustentação ligadas a ordem de segunda potência, e a energia extraída com a terceira potência da velocidade do vento. Esses comportamentos geram uma necessidade de controle da potência do rotor de modo a evitar sobrecarregamento. Duas formas de controle que podem ser observadas são as chamadas de controle stall e controle de passo.

2.1.5.1. Controle de stall

O controle de stall é considerado por Santos et al (2006) um sistema passivo, pois o ângulo de passo é praticamente constante. Tal metodologia utiliza o fato de que o ângulo de ataque tem aumento diretamente proporcional a velocidade do vento. Sendo assim, o ângulo de ataque é escolhido de forma que quando as velocidades do vento forem superiores a nominal, o escoamento do perfil da pá do rotor descola da superfície o que se dá o nome de stall, que caracteriza uma redução de forças de sustentação e aumento na força de arrasto. Tais ocorrências evidenciam uma

diminuição na potência do rotor, com intuito de se evitar que essa diminuição ocorra em velocidades baixas, é usual ocorrer uma pequena torção longitudinal na pá.

A vantagem do método está ligada a simplicidade do sistema, no entanto necessita de cálculos aerodinâmicos complicados para se definir com precisão o ângulo de ataque para qual a pá entra em stall.

Segundo Montezano(2007) uma simplificação desse efeito pode ser realizada, e será explicitada a seguir:

Considerando que o coeficiente $C_p(\lambda, \beta)$ tem dependência da turbina eólica sendo função de razão de velocidades λ e do ângulo de passo β . Caracteriza-se o coeficiente como sendo bidimensional, e se tem aproximações numéricas mostradas por Montezano(2007) como a equação a seguir

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,5 \left(\frac{98}{\lambda i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{\frac{-16,5}{\lambda i}} \quad (22)$$

Com

$$\lambda i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0,089} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}} \quad (23)$$

A figura a abaixo foi retirada do trabalho de Montezano(2007), e mostra a variação de C_p .

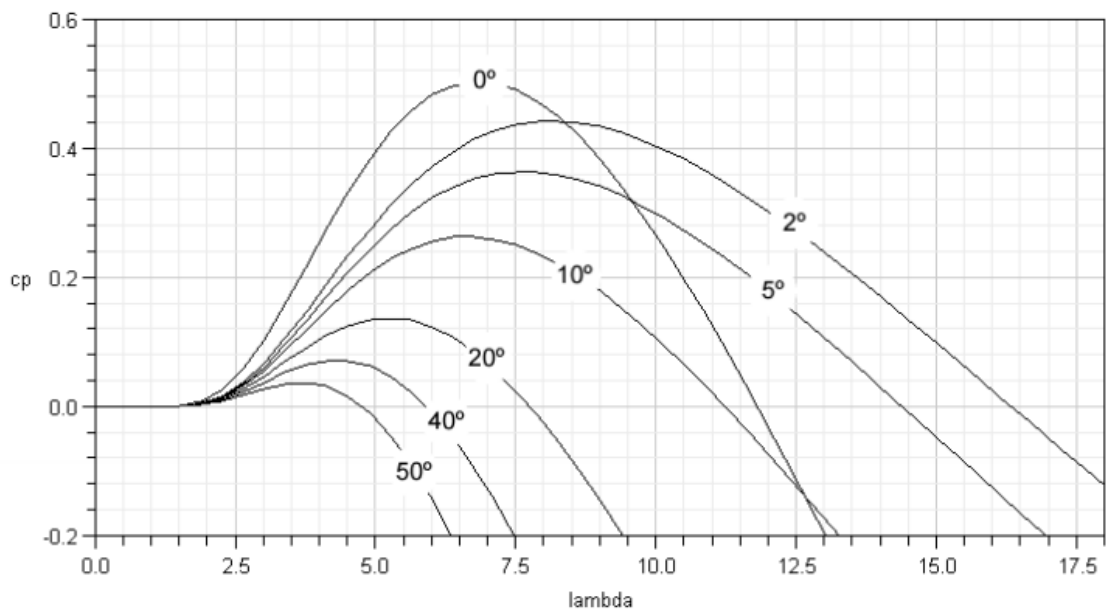


Figura 12 Característica C_p com variação do λ

2.1.5.2. Controle de passo

Segundo Santos et. al (2006) o controle é um sistema ativo, que necessita de uma informação do controlador. Este é utilizado sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada, tal fato pode ocorrer pelo aumento da velocidade do vento. Ao receber a informações a respeito da potência gerada no momento, as pás do rotor tendem a alterar o ângulo de passo, afim de que o ângulo de ataque mude, e consequentemente as forças aerodinâmicas atuantes. Visa-se sempre trabalhar na potência nominal, logo o ângulo tende a variar, fazendo que até mesmo pequenas forças de arrasto gerem sustentação aerodinâmica.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

As restrições impostas pelas análises experimentais impões a necessidade de se realizar experimentos em escala reduzida, mas que apresentem os mesmos valores para os grupos adimensionais pertinentes a eles, pois este fato garante uma semelhança dinâmica. O termo semelhança indica que os fenômenos em estudo têm o mesmo comportamento, quando se tem um estudo em menor escala, este é denominado modelo.

A utilização de um modelo garante inúmeras vantagens, especialmente quando se observa os quesitos tempo e dinheiro. Além disso também é possível utilizar diferentes métodos de comparação. Contudo para se garantir que o modelo tem semelhança física com protótipo, é necessário garantir que exista uma semelhança geométrica, cinemática e dinâmica.

A semelhança geométrica está relacionada à forma, que deve ser a mesma tendo diferença apenas no comprimento do modelo. Comprimento este, que deve ser constante para todos os componentes, esta razão entre o real e o modelo se dá o nome de fator de escala. Vale salientar que todos os componentes devem estar inclusos no modelo para as devidas análises.

A semelhança cinemática corresponde à relação de movimento, e é garantida quando dois fluxos de diferentes escalas geométricas têm ao mesmo formato de linhas de corrente. Consequentemente possuem uma relação constante as de velocidade e aceleração do modelo real.

Por fim tem-se a semelhança dinâmica, que tem interação com as forças aplicadas aos sistemas. E estes são ditos semelhantes dinamicamente quando os valores absolutos das forças em pontos equivalentes dos dois sistemas têm razão fixa.

3.1. Descrição dos componentes experimentais

3.1.1. Kit windpitch

O ensaio em escala se desdobra como o principal feito do projeto, haja vista a gama de informações que é possível extrair. Para que tal simulação seja realizada será utilizado um kit windpitch do modelo FCJJ-29 e fabricante Horizon Fuel cell Technologies. O Kit é composto pelos componentes explicitados na figura 12:

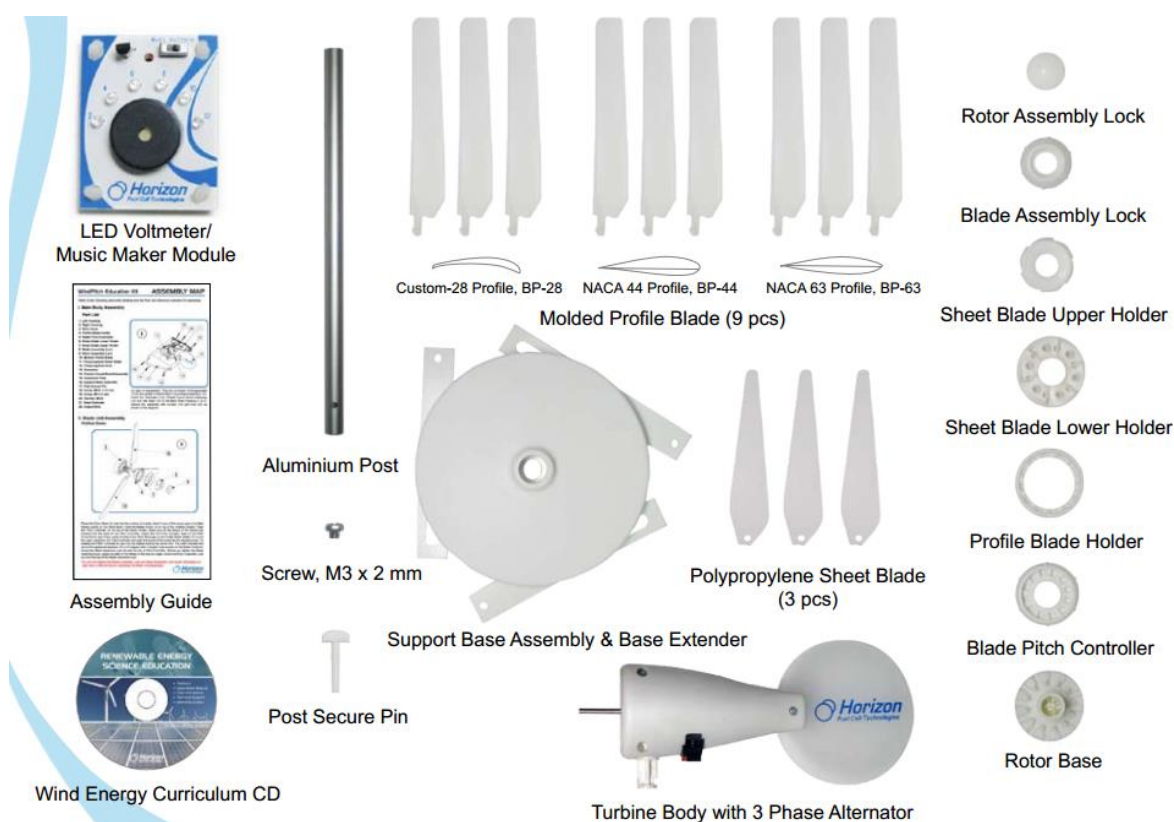


Figura 13 Componentes do kit WindPitch. Fonte: Horizon Fuel Cell Technologies

O software incluso no pacote permite o monitoramento de algumas variáveis como corrente, tensão, potência e resistência. Além disso permite gravar e exportar esses dados para uma planilha com o formato excel, que auxiliará na análise de dados.

Com o objetivo de se analisar vários cenários, será aproveitada a versatilidade do kit windpitch, para se desenvolver as alterações ligadas a:

3.1.1.1. *Variação quanto o número e tipo de pás*

O kit utilizado contém nove hélices, subdividas em três perfis como mostrado na figura 10 os quais são o custom-28, o NACA 44 e o NACA 63.

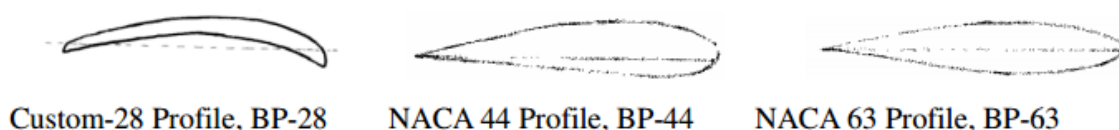


Figura 14 Perfis de hélice encontrados no kit windpitch. Fonte: Horizon Fuel Cell Technologies

Contudo este trabalho levantará uma análise específica apenas para os perfis NACA, excluindo o custom-28. Para um melhor entendimento o tópico 3.3 foi separado exclusivamente para mostrar os experimentos realizados e seus devidos e procedimentos.

3.1.1.2. *Análise do ângulo de ataque*

O referencial teórico mostrou uma série de controles possíveis a fim de garantir a potência nominal da turbina e estes estão intimamente ligados ao ângulo de ataque da turbina. Por isso é importante fazer um mapeamento do comportamento da turbina quanto a variação do ângulo de ataque. Tal feito permite levantar uma proposta de controle de passo, segundo a variação da velocidade do vento, para a turbina em questão.

No modelo REDUZIDO DO AEROGERADOR adotado, o ângulo DE ATAQUE DAS PÁS VAIROU de 0° a 60° , de 10° em 10° . A variação é feita manualmente. A figura 14 mostra a escala de variação de ângulo de pás.

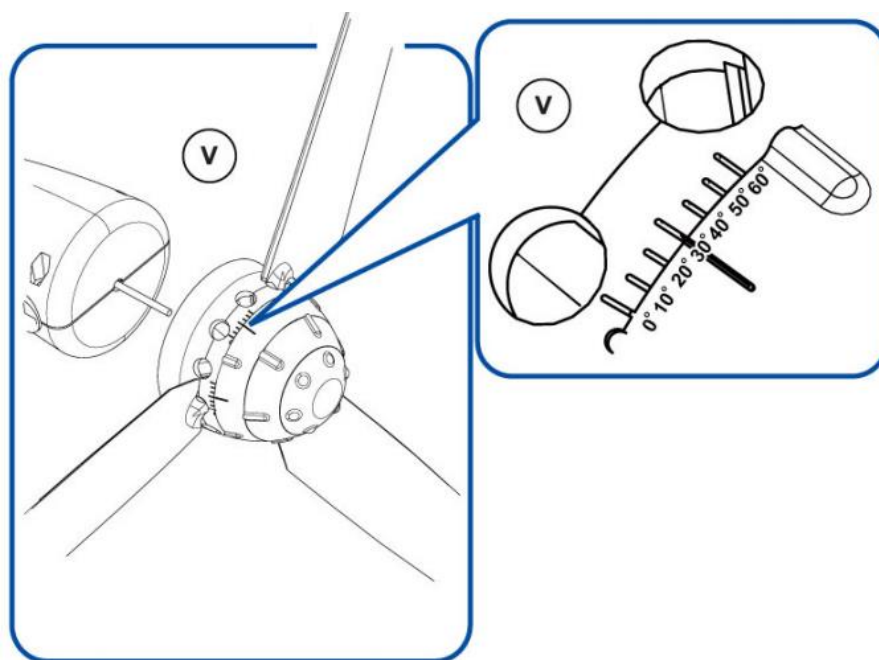


Figura 15 Demonstrativo da mudança de ângulo. Fonte: Horizon Fuel Cell Technologies

3.1.1.3. Carga

Outro componente do kit é a resistência variável, que permite inserir uma carga a turbina. A resistência varia de 0 a 100 ohms, possibilitando variação de 10 em 10.

3.1.2. Túnel de vento

O túnel de vento modelo utilizado se encontra no laboratório na Faculdade UnB Gama, e sua imagem pode ser observada abaixo:



Figura 16 Fotografia lateral do túnel de vento da Universidade de Brasília.

O ar é aspirado por meio de soprador Fig. 16 com potência de aproximadamente 2,17 HP instalado a jusante da tubulação. O soprador é composto por um motor Brien AG e um ventilador Stafa.



Figura 17 Visão soprador túnel de vento

3.1.2.1. Instrumentação do túnel de vento

Com o objetivo de se obter dados suficientes e consistentes para a experimento, uma série de melhorias foram verificadas e até mesmo implementadas na tentativa de instrumentar adequadamente o túnel de vento.

3.1.2.1.1. Tubo de pitot

Na estimativa de se obter um perfil de velocidade dentro do túnel de vento, foi construído um tubo de pitot que pudesse varrer toda a área transversal, e consequentemente pela diferença de pressão pudesse mostrar a velocidade em cada ponto determinado.

Porém FOI DETERMINADA A PROVÁVEL ALTURA OBTIDA NO MANÔMETRO DIFERENCIAL E os cálculos mostraram a inviabilidade de tal procedimento, haja vista que a variação de pressão PARA A VELOCIDADE DO TÚNEL ficaria muito pequena baixa causando um deslocamento muito pequeno na coluna de água do tubo de pitot. Tal verificação vai ser demonstrada abaixo:

Partindo da equação de Bernoulli e do princípio de conservação de massa, tem-se que:

$$\frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 = \frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 \quad (24)$$

Onde p, V, z e g são respectivamente pressão, velocidade, altura e aceleração gravitacional. Podemos simplificar a equação para o tubo de pitot considerando que que não há variação significativa de altura, e que a velocidade V_2 é nula. Readequando os termos, tem-se que:

$$\frac{p_2 - p_1}{\gamma} = \frac{V_1^2}{2g} \quad (25)$$

Considerando que a velocidade do túnel varia entre 3 a 4,5 m/s, valores estes obtidos por um anemômetro manual. Será considerado para os cálculos o menor valor de velocidade 3 m/s, a gravidade igual a $9,8 \frac{m}{s^2}$ e $\gamma = 1,2 \text{ kg/m}^3$ Tem-se:

$$\frac{p_2 - p_1}{\gamma} \cong 0,55 \text{ m} \quad (26)$$

Como no tubo de pitot o fluido é a água, e seu γ_{agua} é aproximadamente 1000 kg/m^3 . Teríamos uma variação de 0,55 mm, que torna a medição inviável.

Tentou-se também utilizar um micromanômetro diferencial para mediar as velocidades com pitot. Para o posicionamento do pitot foi fabricada a peça mostrada na figura 19.



Figura 18 Peça de fabricação próprio para varredura de pressão no túnel

Tal peça consiste em uma agulha que irá PERCORREU ~~por dentro~~ A SEÇÃO do túnel e FOI é ligada ao MANÔMETRO DIFERENCIAL ~~meio-externo~~ por uma mangueira, que não aparece na imagem acima. Tal mangueira é ligada ao medidor diferencial e se tem os dados de acordo com a posição da agulha. A peça foi feita sobre medida para o túnel em questão, e a agulha de medição varia 1,9538 mm por rotação da manivela. Este valor pode ser obtido, pois se utilizou uma barra rosca de 13 fios por polegada.

$$\frac{25,40\text{mm}}{13\text{fios}} = 1,9538 \frac{\text{mm}}{\text{fio}}$$

Apesar do esforço em desenvolver a peça, o anemômetro que seria utilizado teve problemas quanto a sua calibração. E o único disponível não tem escala para levantar um perfil de velocidade satisfatório.

3.1.2.1.2. Inversão do Motor

Como uma tentativa de aumentar a velocidade do escoamento dentro do túnel de se obter maiores velocidades, optou-se por trocar duas fases da ligação do motor. Fazendo com que este deixaSse de trabalhar como um exaustor e passasse a trabalhar como um ventilador, isto porque trocaria o sentido de rotação.

Após a troca houve um aumento significativo dentro do túnel, chegando a dobrar o valor da velocidade do vento. Contudo se observou um nível de turbulência muito alto, chegando ao ponto da turbina ser derrubada quando colocada dentro do túnel para fazer os testes.

3.2. Experimentos realizados e procedimentos

3.2.1. Túnel de Vento

Como supracitada, as tentativas de se caracterizar com maior precisão o túnel não foram possíveis, por isso foi utilizado um anemômetro manual com precisão de 0,1 m/s para fazer as medições no túnel. Pelo qual se verificou a velocidade de 4,2 m/s no centro do túnel, e as velocidades de aproximadamente 2,5 m/s perto das paredes. Vale salientar que esta medição foi realizada na seção que é utilizada para testes.

Região

mostrada

na

figura

abaixo:

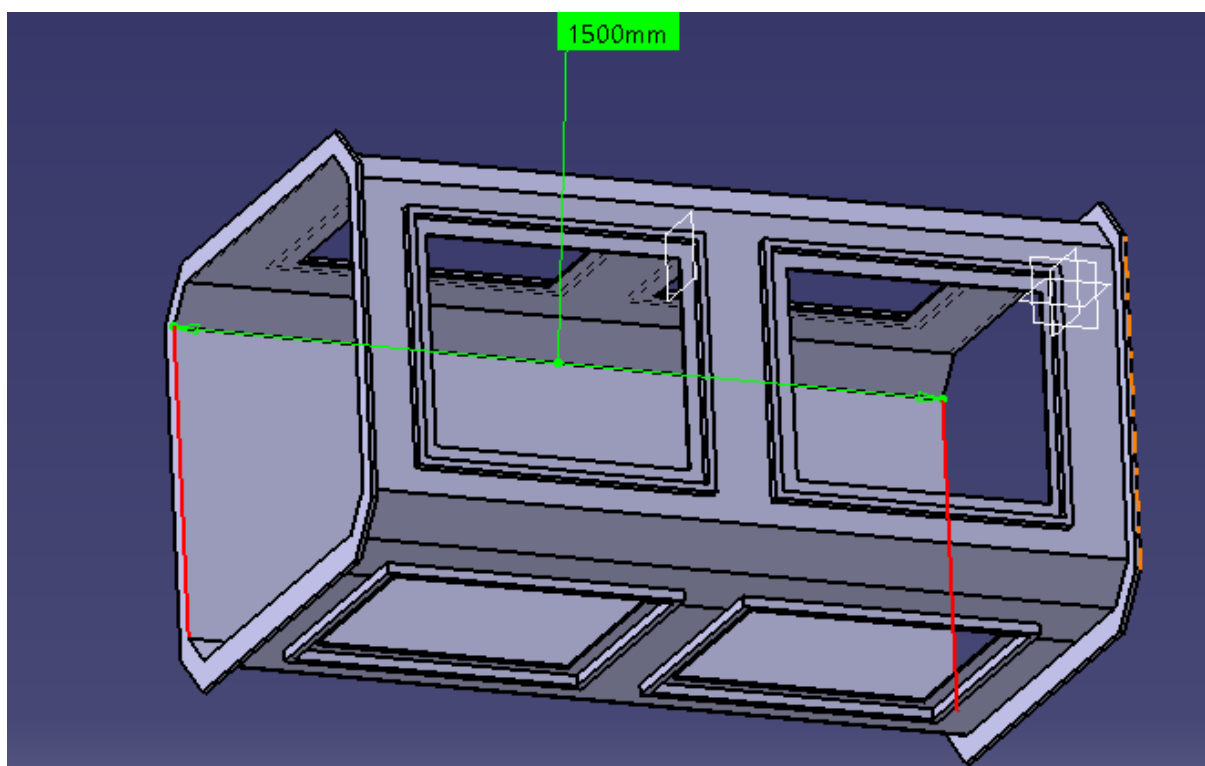


Figura 19 Visualização 3D da seção de testes do túnel

Esta seção do túnel foi dividida em 5 partes no eixo do seu comprimento. Cada subseção tem o comprimento de 300 mm. As medições com o anemômetro mostraram uma variação menor que 1m/s nas subseções mais distantes, por isso não mostrou-se interessante fazer os testes em mais de um local. Escolhendo assim a subseção mais interna para ser realizados todos os testes com a turbina.

3.2.2. Turbina eólica

3.2.2.1. Teste com variação DO NÚMERO de pás

Foram realizados testes com três, quatro e seis pás.

Em testes com três pás foram feitas medições de potência elétrica com os perfis Naca 44 e Naca 63 isoladamente.

Nos testes com quatro pás foram mescladas duas pás perfil Naca 44, e duas Naca 63.

Nos testes com seis pás foram mescladas três pás perfil Naca 44, e três Naca 63.

3.2.2.2. Teste com variação de ângulo

Os testes com 3 pás foram efetuados com a variação de ângulo de 0° a 60°, para ambos os perfis. Com variação de 10 em 10°. Estes testes foram efetuados para a carga em 10 ohms e 90 ohms.

Nos testes com 4 e 6 pás foi fixado o ângulo em 30°.

3.2.2.3. Teste com variação de Carga

Para todos os casos fixou-se o ângulo em 30° e efetuou-se a variação de carga de 10 em 10 ohms, variando de 0 a 100 ohms.

4. Método de simulação

A análise experimental foi realizada no túnel de vento permitindo fazer o levantamento de preceitos básicos a respeito da turbina, gerando caracterização aplicável a modelos em escala.

A análise numérica foi feita no Ansys-CFX e Xfoil, e tem a função de mostrar como o escoamento se comporta. Podendo extrair com isso dados relativos ao arrasto e a sustentação de cada perfil.

Segundo Pegden (1990) uma simulação é uma forma de projetar um modelo computacional de um sistema real que permite conduzir experimentos com o propósito de entender o comportamento, possibilitando assim avaliar estratégias de operação.

4.1. Procedimentos adotados

Tendo o trabalho uma abrangência numérica e experimental, se faz necessário que exista uma relação entre os dados avaliados. Por isso somente os perfis Naca 44 e Naca 63 terão uma abordagem numérica.

Para modelagem em ambiente CAD (*computer aided design*) utilizou-se o xfoil para gerar os pontos a partir do datasheet do fabricante, conforme figura 19.

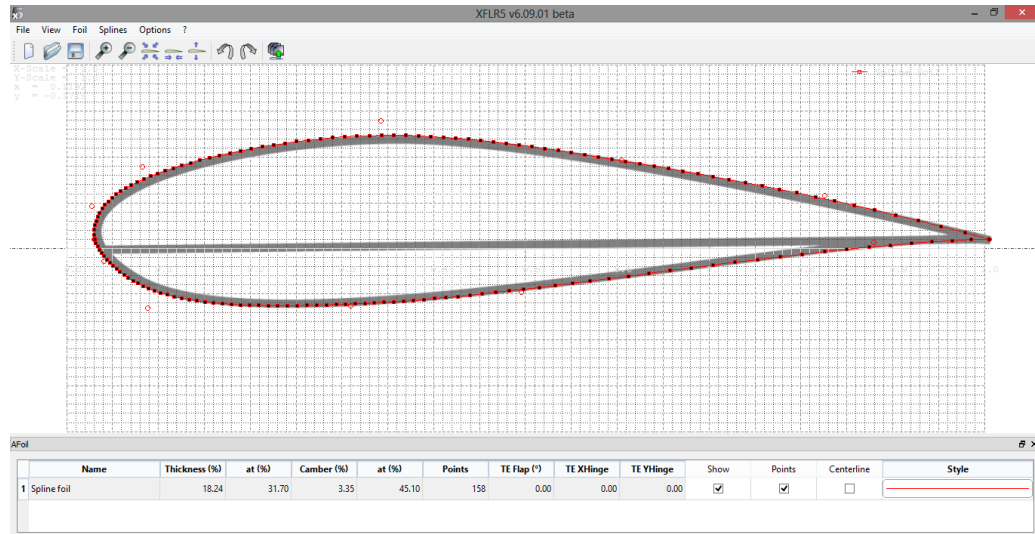


Figura 20 Perfil Naca 63 ambiente Xfoil

Estes foram importados para o software CATIA V5R19 onde o perfil foi modelado em 3D, conforme figura 20.

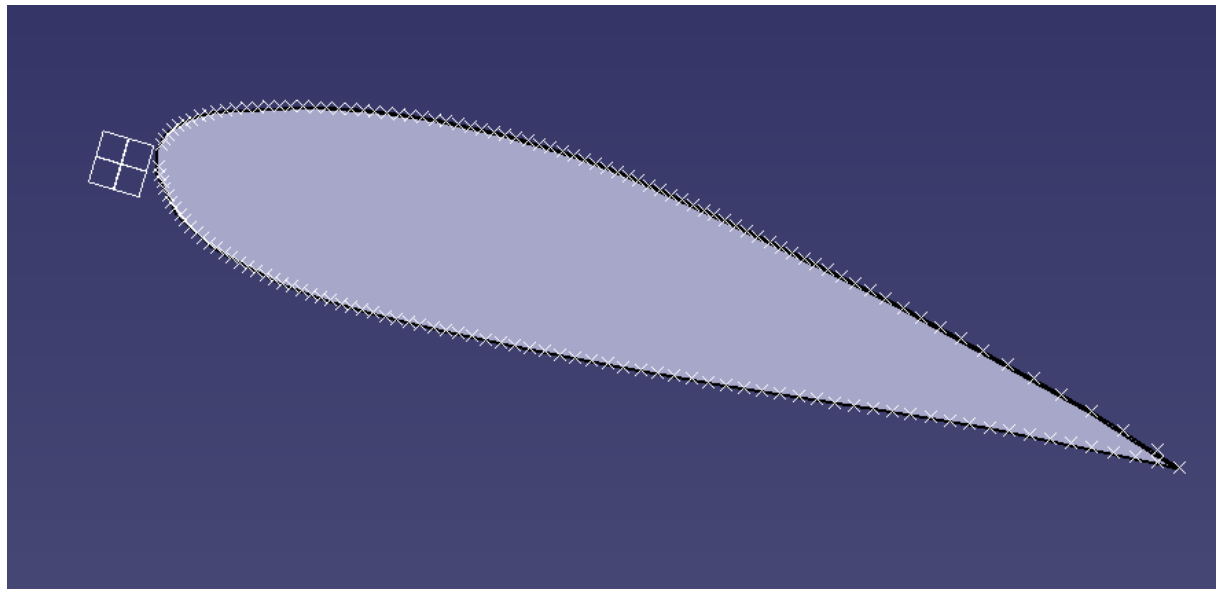


Figura 21 Perfil Naca 63 em ambiente CATIA

Em posse da modelagem, utiliza-se um Ansys-CFX para importar o desenho feito no CATIA. No Ansys foi criado o domínio e gerada a malha. Conforme representada na figura 21.

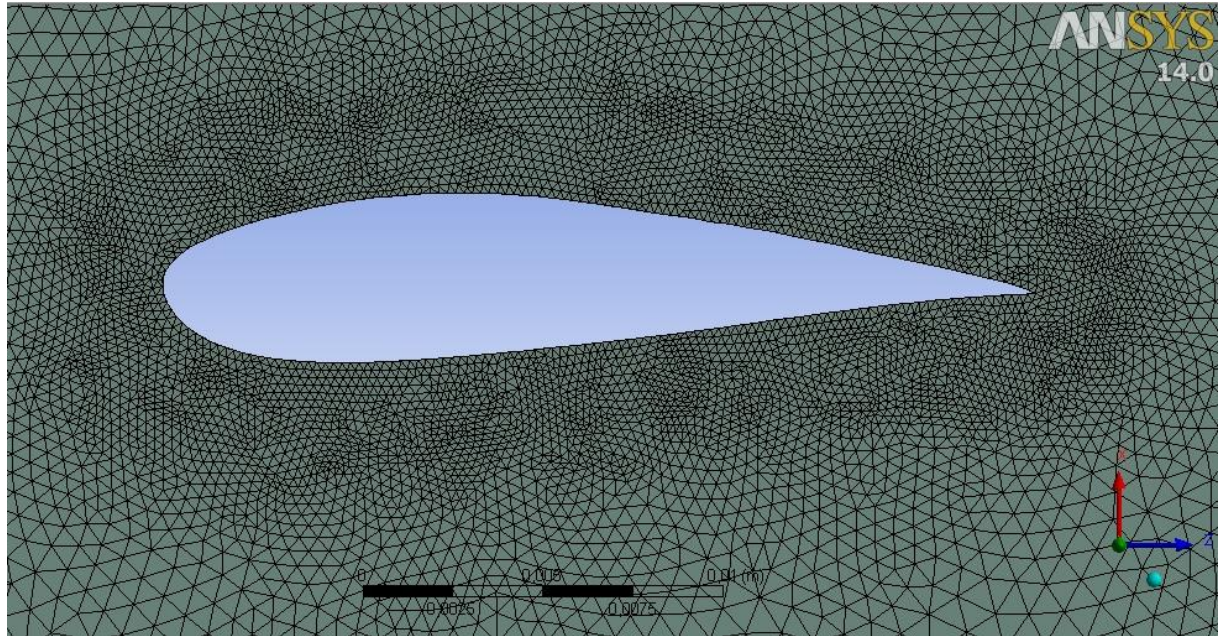


Figura 22 - Perfil Naca 63 e a malha no Ansys-CFX

No Ansys são definidos as regiões de contorno delimitando as regiões de entrada e saída, bem como as equações governantes, conforme Fig. (22).

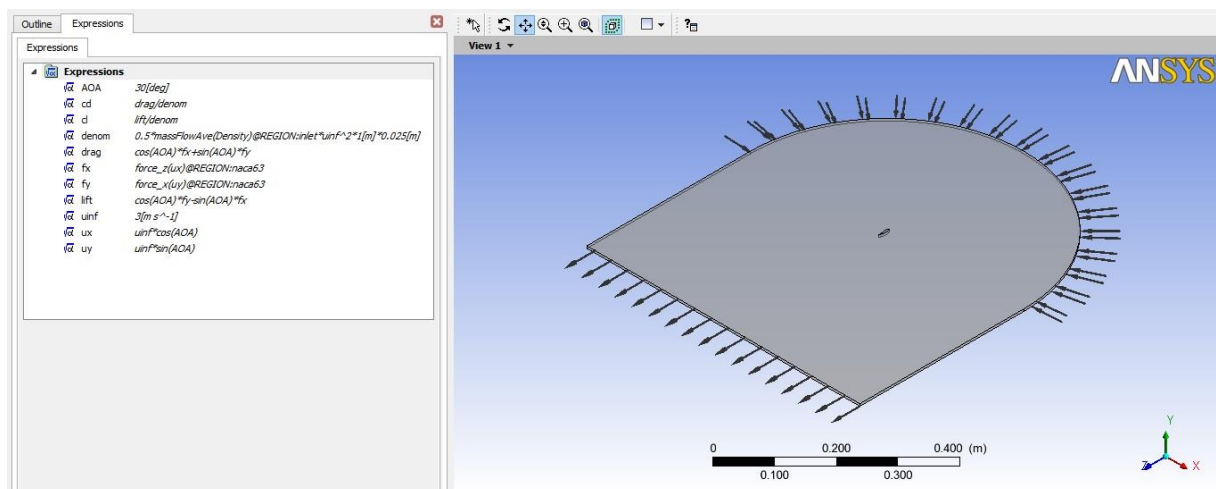


Figura 23 Inserção do domínio e equações no Ansys

Mediante o exposto é possível fazer as simulações pertinentes.

5. RESULTADOS

5.1. Resultados Experimentais

5.1.1. Variação do número de pás

Em posse dos dados experimentais, foi possível levantar as curvas de potência, corrente e tensão segundo a variação da carga aplicada a turbina. Conforme as figuras 19, 20 e 21.

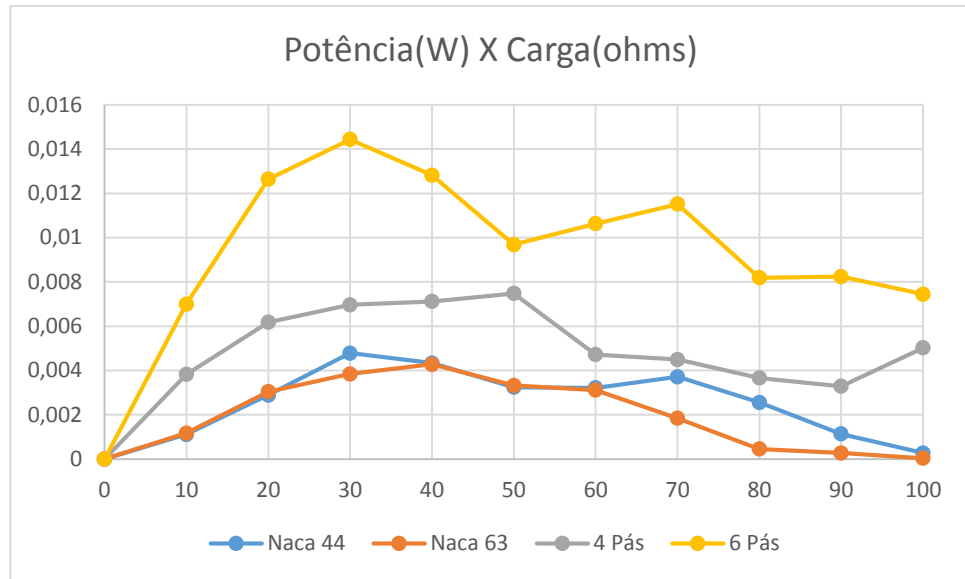


Figura 24 Curva de Potência X Carga

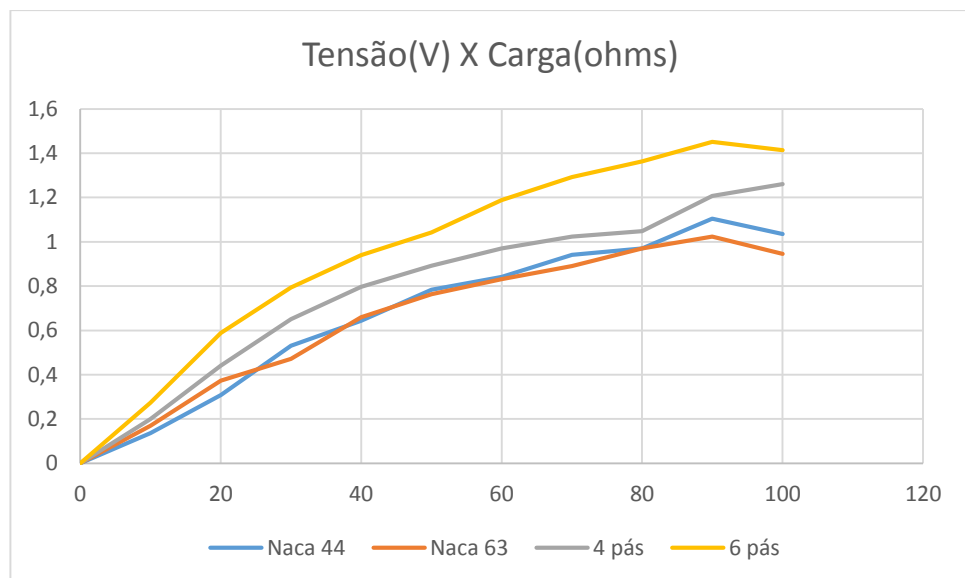


Figura 25 Curva de Tensão X Carga

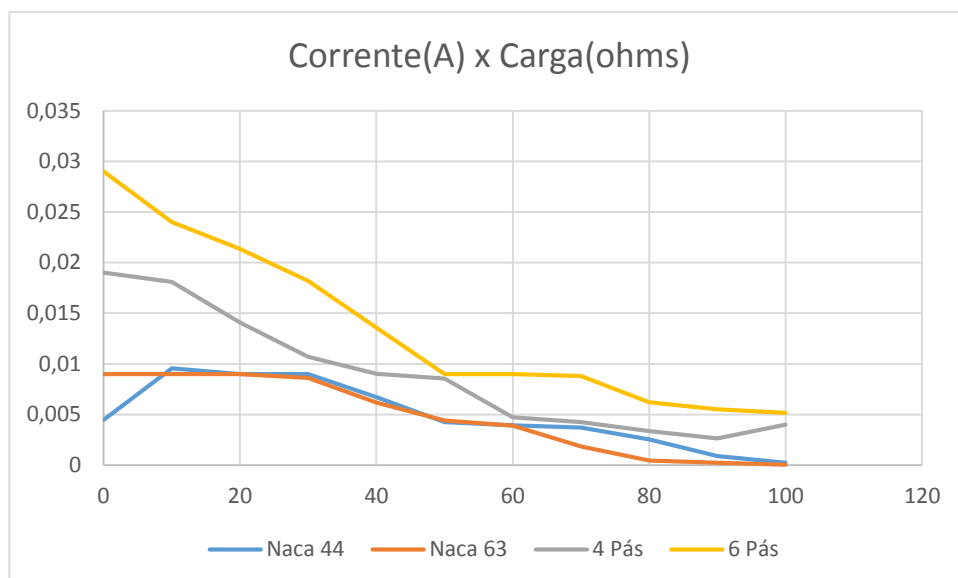


Figura 26 Curva de Corrente X Carga

A curva de potência é o produto entre a diferença de potencial elétrico (tensão) e a corrente, sendo o foco da análise que verifica a geração fornecida pela turbina.

Contrariando a literatura supracitada, a configuração com um maior número de pás se tornou mais atraente. Os testes realizados com combinações de perfis se mostraram superior para toda a variação da carga. E somente na configuração com seis pás foi possível obter dados de trabalho mecânico.

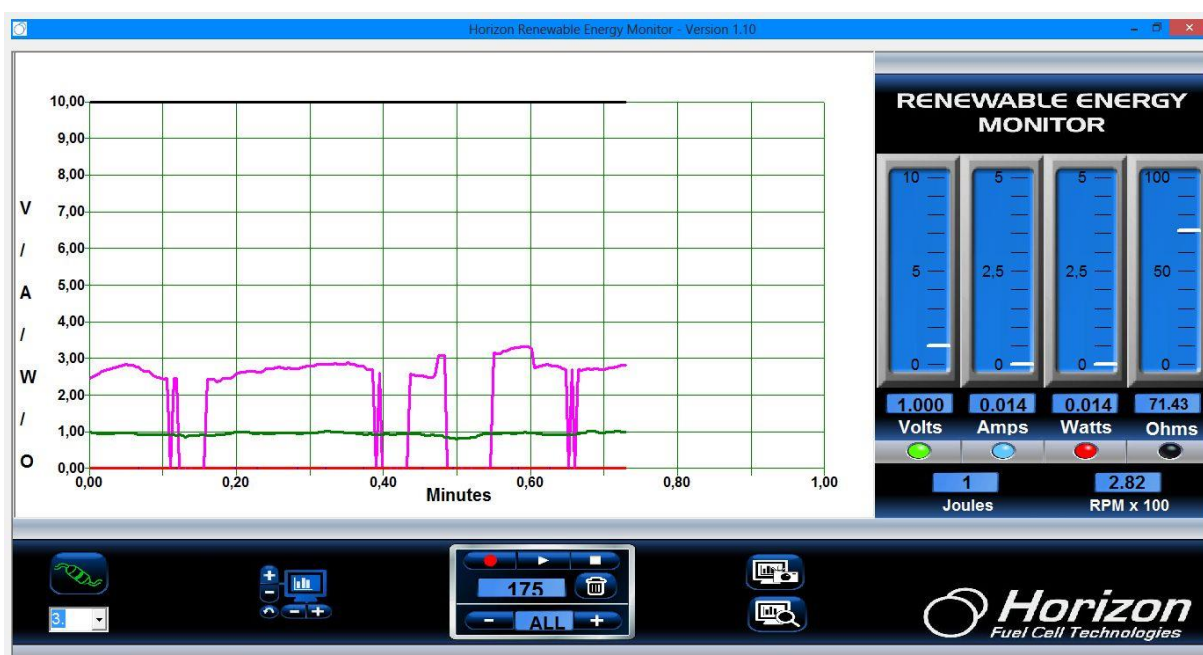


Figura 27 Tela capturada do programa da Horizon

5.2. Perfis NACA 44 e NACA 63

Por limitações experimentais, a comparação entre os perfis será realizada apenas em função do ângulo de ataque. As curvas obtidas são mostradas nas figuras abaixo:

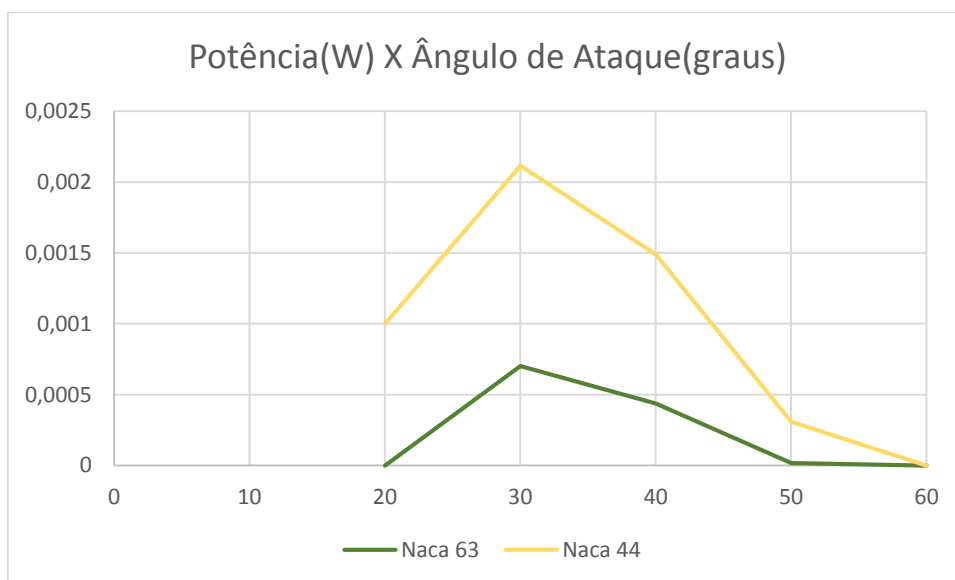


Figura 28 Curva de Potência vs ângulo de ataque com carga 10 ohms

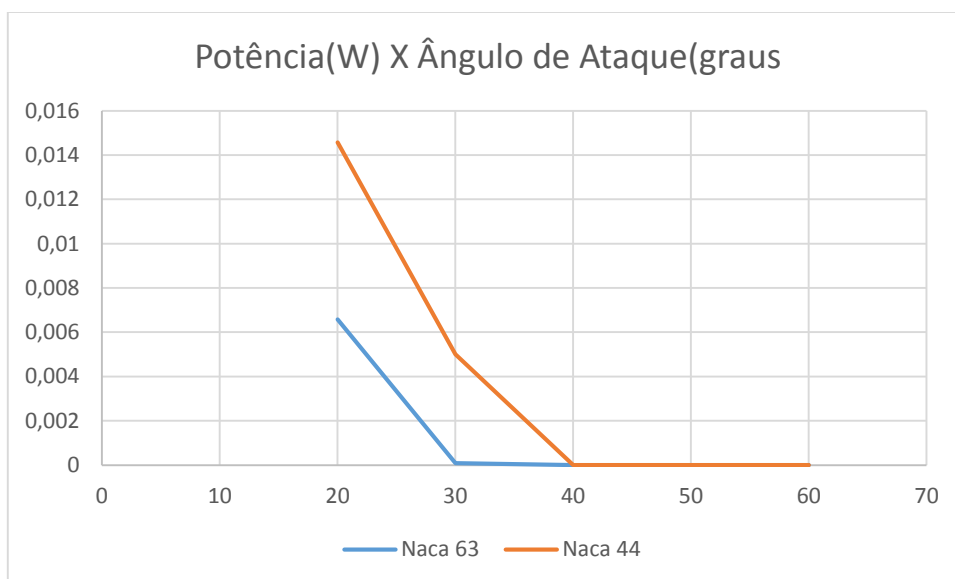


Figura 29 Curva de Potência vs ângulo de ataque com carga 90 ohms

O perfil Naca 44 se mostra superior durante todo experimento e para todos os ângulos propostos. Contudo o comportamento das curvas se mostram similares tendo seu pico e decaimento para os mesmos ângulos.

Uma análise que pode ser levantada é a diferença do ângulo que gera maior potência diante da variação da carga, na figura 23 onde a carga é de 10 ohms a maior

potência para ambos os perfis se dá em 30° , na figura 24 onde se tem uma carga de 90 ohms o ângulo de 20° se mostra superior nos índices de potência.

Vale salientar que com o aumento de carga também se tem variação da rotação da turbina, os dados não podem ser comparados pois para a carga com 10 ohms o programa não retorna dados. Conclusões mais precisas sobre esse fenômeno só poderiam ser levantadas caso houvesse possibilidade de se variar a velocidade do vento, e por consequência a rotação da turbina.

5.3. Resultados Numéricos

5.3.1. Ansys-CFX

As simulações realizadas, mostraram uma inconsistência. Isto porque a variação de ângulo não estava ocorrendo conforme o previsto nas equações impostas. As simulações ocorreram apenas com o ângulo de ataque igual a zero, inviabilizando maiores conclusões a respeito da aerodinâmica de cada perfil. Nas figuras abaixo, são mostrada as linhas de corrente e os contornos de pressão para o perfil Naca 44.

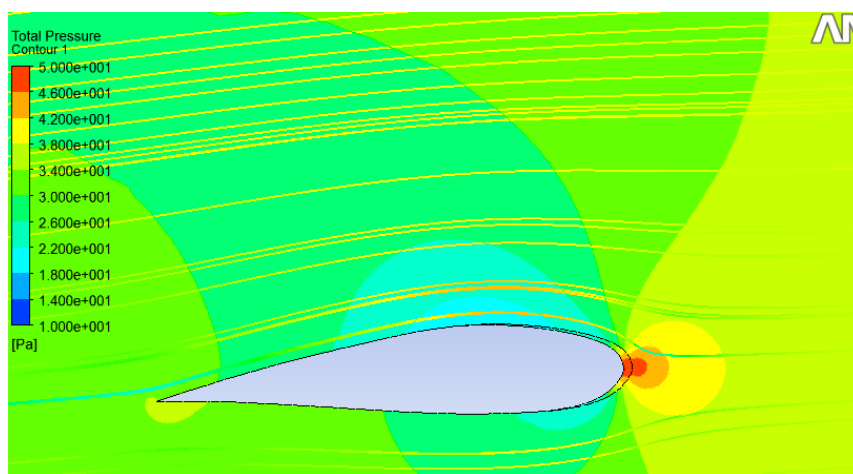


Figura 30 Contornos de pressão do Perfil Naca 44

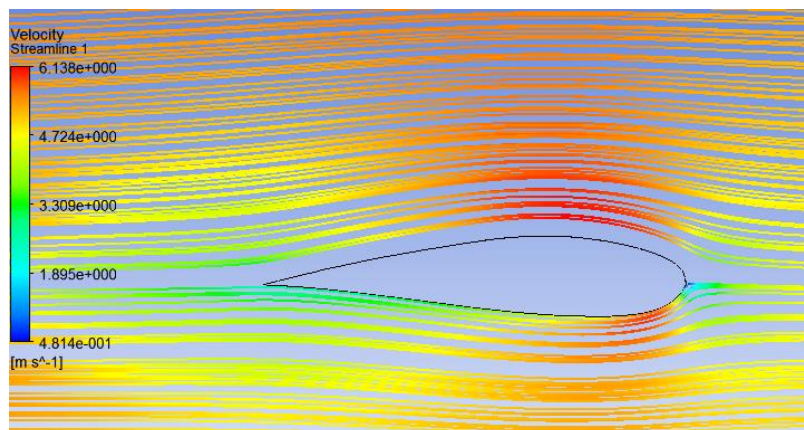


Figura 31 linhas de velocidade do Perfil Naca 44

5.3.2. XFoil

Como forma de suprir os dados não obtidos no CFX, foi levantando a curva de C_l vs ângulo de ataque, conforme fig 31.

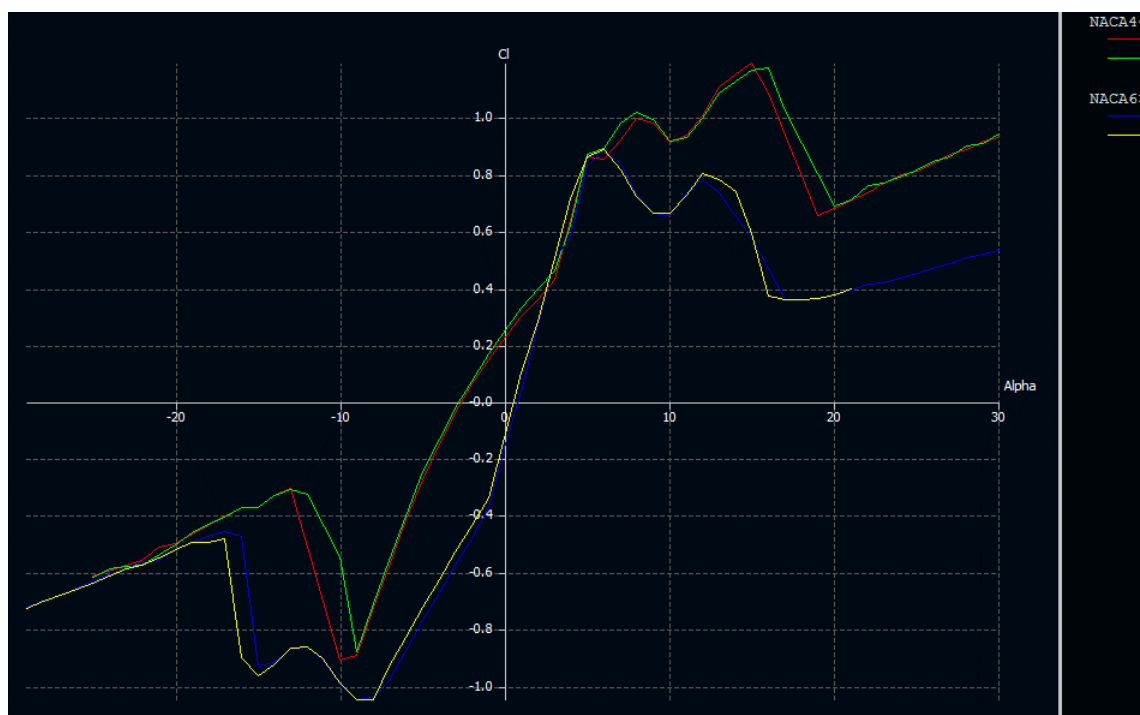


Figura 32 C_l vs ângulo de ataque

Comparando o desempenho dos perfis, é possível comprovar os resultados obtidos experimentalmente. Tendo o Naca 44 um coeficiente de sustentação maior durante toda a análise referente a ângulo. Apesar dessa diferença de valores o comportamento se mostra similar, para ambos os perfis.

6. CONCLUSÃO

A partir das revisões bibliográficas apresentadas neste trabalho foi possível perceber a importância que o conhecimento prévio de uma tecnologia imprime em decisões futuras.

O cenário atual no que tange a área de energia, traz consigo a necessidade de novos estudos, pois só com o aumento da eficiência e conhecimento adequado, será possível reestabelecer um ramo promissor de atuação, como tem sido o de energia eólica.

O presente trabalho não trouxe consigo todas as informações necessárias para se adequar a um modelo reduzido, conseguindo caracterizar apenas a região de melhor trabalho da turbina. Com um comparativo entre os métodos experimental e número foi possível perceber o comportamento similar que ocorre entre as pás adotadas.

Diante da proposta de se utilizar o kit educativo, verificou-se uma série de deficiências no que diz respeito a utilização deste projeto em escala. Isto porque a turbina utilizada não apresenta os mesmos componentes de uma turbina eólica tradicional, levando o estudo para o escopo das pás. Outro fator que impossibilitou o prosseguimento do projeto foi a falta de instrumentação adequada para o túnel e para a própria turbina, sabendo que o melhor resultado obtido foi com a utilização de seis pás (três do perfil Naca 44 e três Naca 63) não é possível prever do ponto de vista estrutural o quão prejudicial pode ser a utilização de pás com perfis diferentes.

Bibliografia

CALDAS, Daniel Monteiro. 2010. Estudo de Potencial Eólico e Estimativa de Geração de Energia de um Projeto Eólico na cidade do Rio de Janeiro utilizando o WindPro e WsP. UFRJ, 2010.

CAPRIGLIONE, Paulo Sergio, 2007. A Energia Renovável na Matriz energética Brasileira. São Paulo, 2006.

Costa, Marcela Francisca Xavier da Costa, 2008. Estudo da Influência do Ângulo das pás de um Aero gerador na Geração de Energia. Paraná, 2008

CUSTÓDIO, Ronaldo dos Santos, 2009. Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica. Eletrobrás Rio de Janeiro, 2009.

FERNANDES, Ana Raquel Coutinho Fernandes. 2010. Avaliação da interferência aerodinâmica entre as pás e a torre de uma turbina eólica. Ceará, 2010.

GOLDEMBERG. José. 2000. PESQUISA E DESENVOLVIMENTO NA ÁREA DE ENERGIA. São Paulo, 2000.

HERINGER, Rodson Masikiv. 2010. ANÁLISE E PROJEÇÃO DO MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL. São Carlos, 2010.

MARQUES, Jeferson, 2004. Turbinas Eólicas: Modelo, Análise e Controle do Gerador de indução com Dupla Alimentação. Rio Grande do Sul, 2004.

SANSON, Diego Moulin. 2006. PROJETO BÁSICO DE UM SISTEMA AEROGERADOR. Vitória, 2006.

SANTANA, Maurício Nunes. 2009. ESTUDO E AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA. Salvador, 2009.

SANTOS, Alison Alves et. al. 2006 PROJETO DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA. Santos, 2006.

BEN 2013. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>>, acessado em 11/11/2013.

RENEWABLES 2012. Global Status Report.

RENEWABLES 2013. Global Status Report.